

Análise comparativa do desempenho elétrico de isoladores tipo pino sob diferentes condições de poluição

Bruno Albuquerque Dias ^[1], Edson Guedes da Costa ^[2], Larissa Diniz ^[3], Antonio Francisco Leite Neto ^[4], João Marcos Leal Rocha ^[5], Victor Gomes Moreno ^[6]

[1] bruno.dias@ee.ufcg.edu.br. [2] edson@dee.ufcg.edu.br. [3] larissa.diniz@ee.ufcg.edu.br. UFCG/COPELE. [4] antonio.leite@ee.ufcg.edu.br. [5] joao.rocha@ee.ufcg.edu.br. [6] victor.moreno@ee.ufcg.edu.br. UFCG/DEE

RESUMO

Este artigo analisa o desempenho de isoladores submetidos a níveis de poluição referente a duas topologias de isoladores de distribuição poliméricos tipo pino, da classe de tensão de 15 kV. Uma plataforma computacional foi utilizada para simular a influência de vários níveis de criticidade da poluição na operação dos isoladores. Camadas de poluição, com a variação dos parâmetros de condutividade e permissividade, foram modeladas na superfície dos isoladores e o potencial elétrico, o campo elétrico e a densidade de corrente nos isoladores poliméricos foram obtidos por simulação computacional. Os resultados alcançados apresentaram o aumento da distribuição de potencial elétrico, do campo elétrico e da densidade de corrente dos isoladores à medida que se aumenta a intensidade da poluição. Os resultados comprovaram também que a topologia com maior número de aletas possui um desempenho superior em condições de poluição. Assim, pode-se concluir que, em longas linhas de distribuição, diferentes topologias de isoladores podem ser utilizadas, de acordo com a região e o microclima que os isoladores estão expostos.

Palavras-chave: Campo elétrico. Isoladores. Isolador polimérico. Linhas de distribuição. Poluição. Potencial elétrico.

ABSTRACT

This paper analyzes the performance of insulators subjected to pollution levels related to two topologies of 15 kV voltage class polymeric distribution isolators. A software was used to simulate the influence of various levels of pollution on the operation of insulators. Pollution layers with the variation of conductivity and permittivity parameters were modeled on the surface of the insulators and the electric potential, the electric field and the current density in the polymeric isolators were obtained by computer simulation. The results showed the increase of the electric potential distribution, the electric field and the current density of the insulators as the pollution intensity increases. The results proved that the topology with four sheds performs better in polluted conditions. Thus, it can be concluded that in long distribution lines different insulator topologies can be used, according to the region and microclimate that the insulators are exposed.

Keywords: *Electric field. Insulators. Polymeric insulator. Distribution lines. Pollution. Electric potential.*

1 Introdução

A demanda energética da sociedade vem crescendo, proporcionalmente, com sua industrialização. Os polos industriais estão em processo de expansão, e o processamento energético se torna fundamental para o desenvolvimento e a continuidade de operação dos meios de produção. Para tanto, a eficiência no transporte da energia elétrica, dos locais de geração, passando pela transmissão, até a distribuição aos centros de consumo, é indispensável.

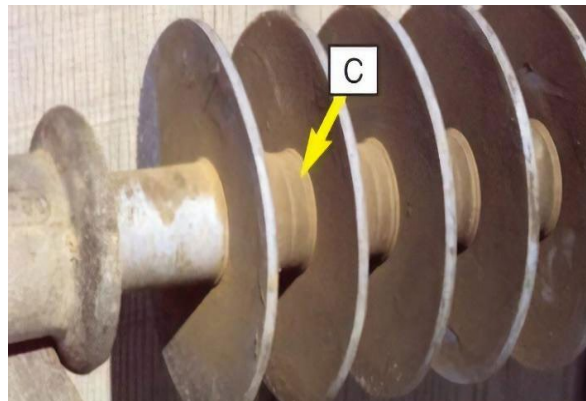
Um dos principais fatores que acarretam falhas dos sistemas elétricos nas grandes cidades está relacionado à degradação dos materiais que compõem os isoladores, principais elementos que integram as linhas de distribuição (NIGRI, 1999). As causas de falhas em isoladores podem decorrer de diversos defeitos e podem atingir apenas uma parte ou o isolador como um todo, sendo alguns dos defeitos característicos: corrosão das ferragens, aletas despedaçadas, exposição do núcleo, fissuras, erosão, trilhamento, entre outros (OLIVEIRA, TOURREIL, 1990; BEZERRA *et al.*, 2018). Além de defeitos, os isoladores podem falhar devido ao acúmulo de poluição, que pode comprometer a capacidade de isolamento a níveis perigosos.

Existem duas formas principais de poluição, que podem acarretar falhas em isoladores: a poluição instantânea e a poluição pré-depositada (AMIN; SALMAN, 2006).

A poluição instantânea consiste em uma contaminação de alta condutividade que se deposita sobre superfícies isoladoras, tornando-as susceptíveis a descargas disruptivas em um tempo curto, menor que uma hora, e, em seguida, retornando a um estado de baixa condutividade. Essa poluição forma um caminho altamente condutivo que pode provocar descargas disruptivas, independente da geometria e das características do isolador. Um caso particular de poluição instantânea são as fezes de pássaros.

A poluição pré-depositada é subdividida em poluição condutora como, por exemplo: i) partículas condutoras metálicas; ii) sais solúveis e ácidos; iii) poluição inerte. Especificamente, a poluição inerte é classificada como hidrofílica ou hidrofóbica, cujos exemplos são: caulim, argila e óleo (DIAS *et al.*, 2017). Um exemplo de poluição inerte pode ser observado na Figura 1, em que, na área representada pela letra "C", destaca-se a coloração do isolador poluído.

Figura 1 – Isolador polimérico poluído



Fonte: EPRI (2006)

A poluição, em geral, pode promover uma degradação momentânea, ou permanente, das características elétricas dos isoladores, resultando em mudanças significativas na sua condição de operação natural, podendo ocasionar distorções na distribuição do potencial e campo elétrico, incitando o surgimento de descargas parciais (ZHANG, 2018; LAN, 2019).

O campo elétrico em um isolador é concentrado sobre suas extremidades de forma uniforme, porém a degradação do material que o compõe e a sua exposição às condições adversas podem distorcer seu módulo e comprometer a uniformidade (DINIZ, 2019). Essa distorção é, em suma, resultado da presença de materiais condutores e do uso de materiais isolantes com permissividades diferentes entre determinadas regiões na superfície do isolador.

A ocorrência de arcos elétricos, o aumento da corrente de fuga e as distorções do campo elétrico acarretam a deterioração do isolador. A intensidade e a frequência de ocorrência dos arcos elétricos, o nível da corrente de fuga e a intensidade do campo elétrico, entre outros, são parâmetros utilizados na avaliação do seu grau de degradação e, conseqüentemente, suas aplicabilidades em campo permitem quantificar a eficiência da linha de distribuição.

Diante do exposto, para avaliar o campo elétrico, o potencial elétrico e a densidade de corrente de isoladores poliméricos tipo pino, simulações computacionais foram utilizadas neste trabalho. Essas simulações foram realizadas com o *software* COMSOL *Multiphysics*, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), procedimento matemático que determina as variáveis de interesse a partir de equações diferenciais. A modelagem 3D das duas topologias foi realizada utilizando o *software* AutoCAD. A incidência da poluição foi modelada por meio da

inserção de uma camada condutiva sobre a superfície dos isoladores, variando parâmetros de condutividade e permissividade, que emulam três níveis de poluição.

A constatação do tipo de topologia de isolador que se sobressai aos diferentes níveis e condições de poluição é relevante, permitindo, assim, a aplicabilidade do ativo mais adequado à solicitação dos esforços elétricos causados pela poluição (DIAS *et al.*, 2019). Pelo exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar duas topologias de isoladores poliméricos tipo pino, da classe de tensão 15 kV, verificando qual delas apresenta melhor desempenho/aplicabilidade para três níveis de poluição: baixa, média e alta.

Trabalhos na mesma área foram desenvolvidos por Volat (2013), Lopes (2016), Zhang (2018) e Lan *et al.* (2019). Destacam-se também os trabalhos de Dias *et al.* (2017), Bezerra (2018), Diniz (2019) e Dias *et al.* (2019), que analisaram isoladores em condições adversas de operação, como incidência de poluição e defeitos internos, por meio de simulações multifísicas. Este trabalho apresenta o diferencial de analisar campo elétrico, distribuição de potencial e densidade de corrente em geometrias 3D para duas topologias diferentes de isoladores de distribuição, em variadas condições de intensidade de poluição.

Além dessa introdução, este artigo está dividido nas seguintes seções: referencial teórico, que apresenta os temas necessários ao entendimento da pesquisa, neste caso, os efeitos da poluição em isoladores e os métodos dos elementos finitos; metodologia, que descreve o material utilizado na pesquisa e os métodos empregados no desenvolvimento das simulações; resultados da pesquisa e conclusão.

2 Referencial teórico

Os conceitos básicos, o efeito da poluição nas linhas de transmissão e de distribuição e os procedimentos de medição de poluição em isoladores são apresentados nesta seção. O método dos elementos finitos é descrito de forma sucinta, além de noções básicas sobre simulações multifísicas.

2.1 Poluição em isoladores

A medição da poluição depositada em isoladores é realizada, normalmente, a partir do valor da *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) e da *Non Soluble Deposit Density* (NSDD). A ESDD é responsável pela condutividade elétrica, e a NSDD é responsável pela fixação da camada de poluição na superfície do isolador (MELLO *et al.*, 2008).

A ESDD é obtida por meio da lavagem do isolador em um volume conhecido. Em seguida, realiza-se a medição da condutividade da solução resultante da lavagem. A concentração de sal equivalente à condutividade obtida na lavagem dos isoladores é descoberta a partir de curvas padrão de concentração em relação à condutividade de soluções de NaCl (PINHEIRO, 2008).

A medição da NSDD é realizada por meio da filtragem da solução obtida para a ESDD, em que o filtro é colocado em uma estufa para um processo de secagem, e uma pesagem é realizada para quantificar a poluição nele retida. A partir da correlação entre os níveis de ESDD e NSDD, pode-se determinar o grau de severidade da poluição ambiente no local de instalação do isolador.

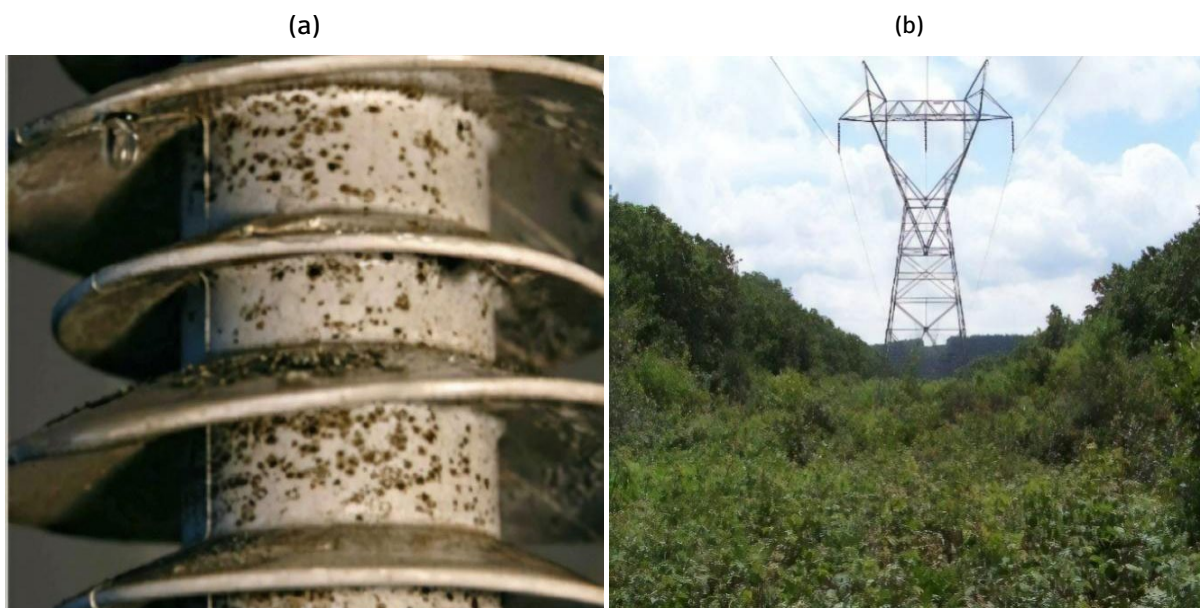
A poluição ambiente compromete a eficiência e o desempenho dos componentes das linhas de distribuição. Na superfície dos isoladores, mesmo que íntegros, a poluição ocasiona redução da capacidade de isolamento. Para os isoladores poliméricos, a superfície hidrofóbica também pode ser impactada (FERREIRA, 2011; ALBANO, WATERS, HADDAD, 2017).

A poluição proporciona, ou intensifica, a não uniformidade do campo elétrico. A ação deste campo no meio isolante, por sua vez, favorece a ocorrência de fenômenos como: descargas parciais internas, descargas parciais superficiais e trilhamento elétrico. Assim, a ocorrência desses fenômenos devido à poluição provoca degradações momentâneas ou permanentes das características elétricas dos isoladores, as quais afetam significativamente a operação do sistema elétrico, causando falhas (FLORENTINO, 2015; LOPES, 2016; DIAS *et al.*, 2017).

Os isoladores contaminados por poluição biológica e os locais em que esse tipo de poluição costuma ocorrer podem ser visualizados na Figura 2 (próxima página).

Os problemas com poluição são encontrados, frequentemente, próximo a áreas industriais, costas marítimas, terras agrícolas, habitats de pássaros, desertos, regiões que nevam e áreas com proximidade a abundante vegetação. Com o rápido avanço da industrialização, os níveis de poluição tendem a aumentar cada vez mais em um futuro bem próximo. Por essas razões, faz-se necessário selecionar ou substituir os isoladores, optando por aqueles que apresentem desempenho satisfatório sob poluição (SUNDARAM *et al.*, 2017).

Figura 2 – Fotografias de isoladores poliméricos: (a) isolador polimérico poluído e (b) isoladores instalados em linha de transmissão próximo à região de vegetação abundante

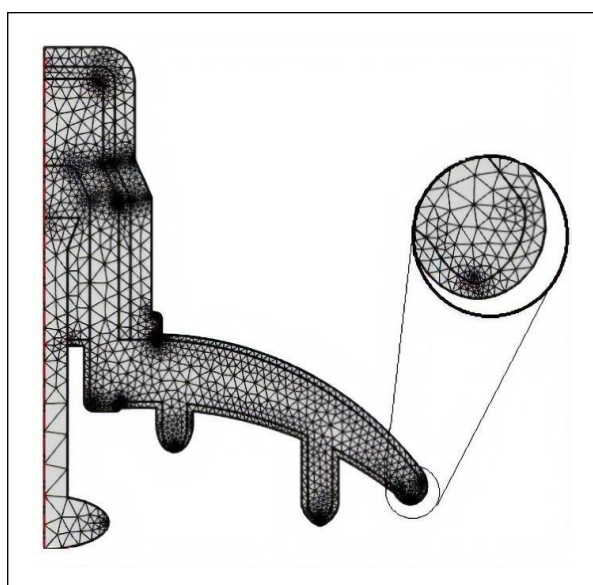


Fonte: Elaboração própria

2.2 Método dos elementos finitos

O MEF consiste em um método numérico para a resolução de problemas que envolvam geometrias complexas com base em equações diferenciais parciais (SADIKU, 2004). Um exemplo da discretização de um isolador por meio do MEF, que é uma das etapas para análise, pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de uma análise por MEF para um isolador de vidro



Fonte: Dias et al. (2017)

De acordo com Sadiku (2004) e Ferreira (2007), a aplicação do MEF em um problema envolve cinco etapas:

1. Discretização do domínio (objeto de estudo) em elementos finitos, em que as sub-regiões são geometrias simples cujos pontos comuns são denominados nós;
2. Definição de um modelo que melhor descreva o fenômeno físico envolvido e definição das equações, a partir das funções de interpolação calculadas em cada nó;
3. Construção de uma matriz global representando um sistema de equações, conectando todos os elementos em um domínio. As condições de contorno devem ser delimitadas nessa etapa;
4. Solução do sistema de equações obtida utilizando o cálculo numérico;
5. Visualização e consulta dos valores numéricos dos resultados do caso analisado por meio da aplicação do MEF em *softwares*.

Com o objetivo de avaliar as variáveis de interesse que possam identificar a eficiência de isoladores em operação, foram utilizadas, neste estudo, simulações computacionais realizadas com o *software* COMSOL *Multiphysics*, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF tem sido amplamente utilizado e apresenta resultados de fácil visualização e interpretação, independentemente da complexidade

do problema analisado. Devido às suas características de flexibilidade e de estabilidade numérica, pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e sistemática. Além de permitir a análise de problemas práticos, o MEF diminui os custos de projeto, pois permite a simulação computacional de vários fenômenos físicos e seus efeitos antes da construção de um protótipo do equipamento (BARROS; FERREIRA; COSTA, 2013).

O avanço das ferramentas computacionais, e a consequente redução dos custos, popularizou o MEF não apenas na esfera dos projetistas – responsáveis por programar e desenvolver *softwares* baseados no método –, mas também dos usuários que buscam entender o conceito por trás de programas como o FEMM, FEMLAB e o COMSOL *Multiphysics*.

3 Metodologia

Nesta seção, são apresentados os materiais utilizados como objetos de teste da pesquisa e os métodos empregados para realização das simulações computacionais.

Os isoladores são utilizados como objeto de teste da pesquisa apresentada. As simulações são realizadas usando duas geometrias de isoladores tipo pino, de material polimérico e classe de tensão de 15 kV. Os isoladores são modelados graficamente em 3D com a utilização do *software* AutoCAD®, e as análises são feitas a partir do *software* COMSOL *Multiphysics*®. Os isoladores que são modelados para a utilização nas simulações computacionais podem ser observados na Figura 4.

Os isoladores, apesar de serem da mesma classe de tensão, apresentam formatos diferentes: o isolador da Figura 4a possui três aletas de mesmo tamanho e o isolador da Figura 4b apresenta quatro aletas, duas maiores e duas menores intercaladas.

A metodologia utilizada para as simulações computacionais adota o *software* COMSOL *Multiphysics*®, baseado no método dos elementos finitos.

As simulações têm por objetivo permitir a análise do potencial elétrico, do campo elétrico e da densidade de corrente. Ao final, a influência da poluição na operação dos isoladores é determinada, além da melhor opção para sua utilização. No procedimento de simulação, inicialmente, é determinado o domínio geométrico do problema como 3D. Posteriormente, o domínio físico do problema é definido (*Electric Currents*, no caso do *software* utilizado). Para a definição

completa do problema, um espaço limitado é definido contendo o arranjo e demais elementos modelados.

Figura 4 – Isoladores modelados para análise



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Para representar a poluição nos isoladores objeto do estudo, uma camada de 2,0 mm sobre a superfície de todo o isolador foi aplicada. O nível de poluição utilizado depende da região, mudando de acordo com o local, o tempo de exposição e a umidade ambiente, e é modelado pela variação dos valores de permissividade e de condutividade elétrica da camada poluente. Essa variação foi realizada com o objetivo de avaliar desde um nível leve de poluição até um nível elevado.

Após a modelagem, é necessário inserir as constantes físicas que caracterizam cada material

do sistema simulado. O material atribuído ao pino do isolador foi o ferro galvanizado, enquanto que para o corpo do isolador foi atribuído material polimérico. O alumínio foi utilizado na modelagem do cabo condutor. Para a poluição, foram atribuídas as constantes de poluição leve, média e elevada, conforme o Quadro 1. Esses níveis de poluição podem representar: poeira, limo, fezes de animais, entre outros.

As constantes que caracterizam os materiais foram obtidas nas bibliotecas do próprio *software* de simulação, e algumas outras em referências da literatura, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Constantes atribuídas aos materiais presentes na simulação

Material	ϵ_r – Permissividade relativa	σ - Condutividade elétrica (S/m)
Ar ^(C)	1,00	$1,00 \times 10^{-15}$
Ferro galvanizado ^(A)	$1,00 \times 10^5$	$5,98 \times 10^7$
Alumínio ^(C)	$1,00 \times 10^5$	$35,5 \times 10^6$
Polímero ^(C)	4,5	$1,00 \times 10^{-5}$
Poluição leve ^(B)	15	$1,00 \times 10^{-6}$
Poluição média ^(B)	15	$1,00 \times 10^{-5}$
Poluição elevada ^(B)	15	$1,50 \times 10^{-4}$

Fonte: (A) Hamdam (2006), (B) Volat (2013) e (C) Diniz (2019)

Na sequência, as condições de contorno são aplicadas, como a tensão de operação no cabo, que consiste na tensão nominal do isolador de 15 kV e o potencial terra na ferragem de fixação. Posteriormente, todos os elementos que compõem o domínio são divididos em regiões denominadas de malha, conforme apresentado na Figura 5.

Esse processo é conhecido como discretização. A partir dos resultados, é realizada a análise necessária aos interesses do estudo.

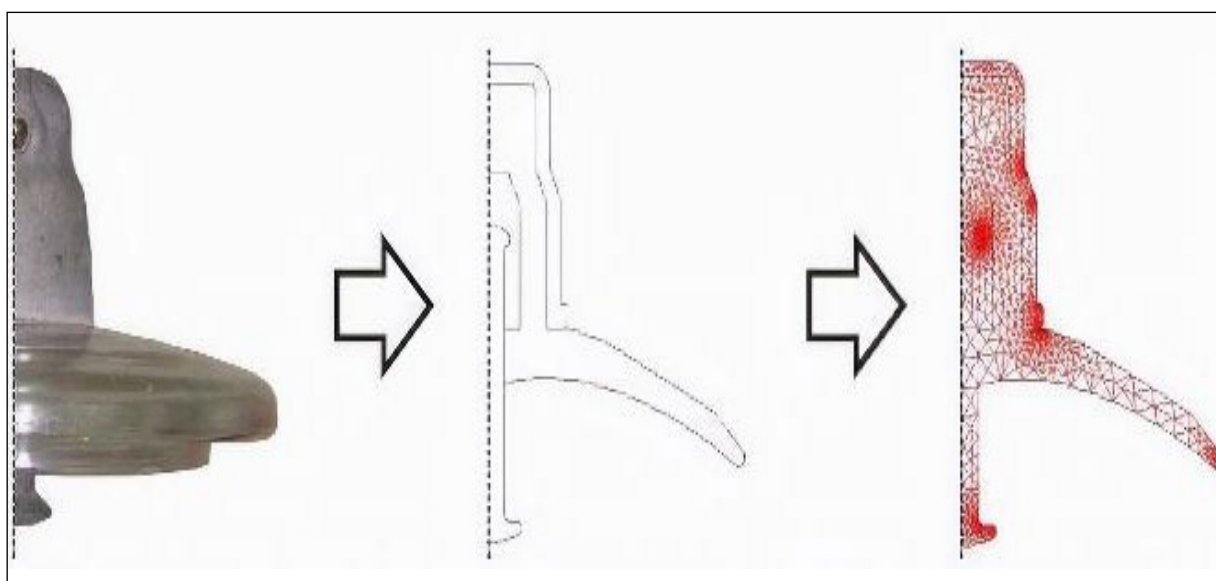
4 Resultados da pesquisa

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações e da modelagem do isolador, a distribuição de potencial elétrico, do campo elétrico e da densidade de corrente, inicialmente para o isolador 1, com três aletas, e posteriormente para o isolador 2, com quatro aletas.

4.1 Isolador 1

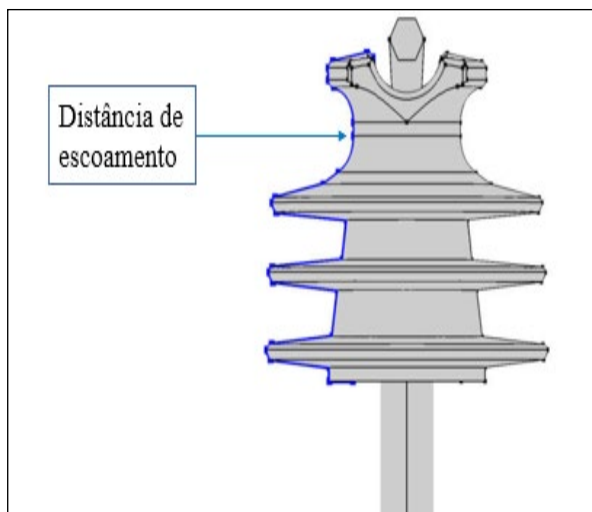
Nesta subseção, os resultados obtidos para o isolador 1 são apresentados, variando-se a poluição em leve, média e elevada. Na Figura 6, é possível observar a geometria do isolador modelada em 3D, em que a poluição ambiente foi emulada por uma camada de 2,0 mm exterior à superfície do isolador; em azul, destaca-se a distância de escoamento do isolador. A distância de escoamento consiste no menor caminho sobre a superfície do isolador entre o cabo energizado e a ferragem terra.

Figura 5 – Isolador discretizado no COMSOL *Multiphysics*®



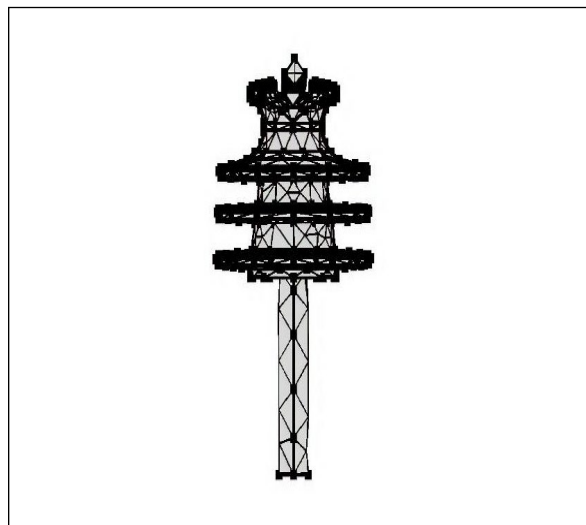
Fonte: Ferreira (2007).

Figura 6 – Geometria em 3D modelada no AutoCAD® do isolador 1



Fonte: Elaboração própria

Figura 7 – Discretização da geometria do isolador 1



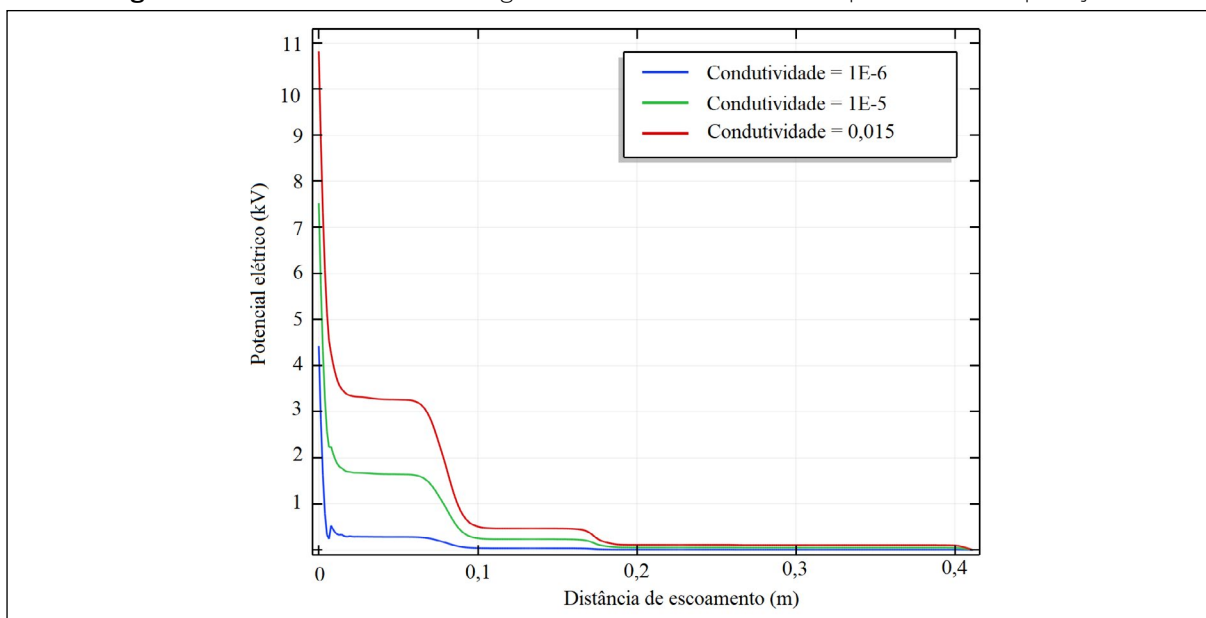
Fonte: Elaboração própria

Após a inserção dos materiais descritos na metodologia e das condições de contorno, a discretização do isolador foi realizada. Em seguida, foram feitas as análises das variáveis de interesse. A discretização do isolador 1 pode ser observada na Figura 7.

Conforme apresentado na metodologia, aplica-se a tensão de 15 kV fase terra, em frequência industrial, no terminal fase. A distribuição de potencial ao longo

da distância de escoamento do isolador 1, para os três níveis de poluição propostos, é ilustrada na Figura 8. A poluição leve corresponde à condutividade apresentada em azul, a poluição média corresponde à condutividade apresentada em verde e a poluição elevada corresponde à condutividade apresentada em vermelho. Quanto maior o nível de poluição, maiores serão os valores da distribuição de potencial elétrico ao longo do isolador.

Figura 8 – Potencial elétrico ao longo da distância de escoamento para três níveis poluição



Fonte: Elaboração própria

A variação da distribuição de campo elétrico no isolador 1 pode ser visualizada, conforme apresentado na Figura 9. Com o aumento no nível de poluição, o campo elétrico se torna mais intenso ao longo do isolador. Além da distribuição de potencial e campo elétrico, foi simulado, ainda, o comportamento da densidade de corrente na superfície do isolador, conforme ilustrado na Figura 10.

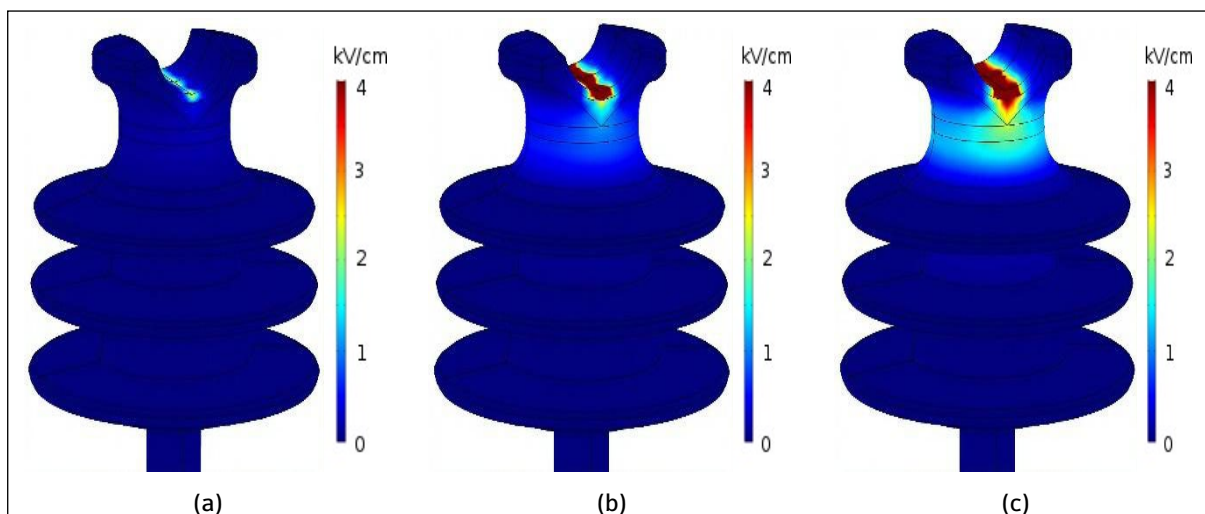
Constata-se que a densidade de corrente se comporta de maneira semelhante ao potencial e ao campo elétrico, no sentido de aumentar o número de regiões em que é mais intensa.

4.2 Isolador 2

Seguindo a mesma metodologia, a geometria do isolador 2 em 3D foi modelada, em que a poluição ambiente foi emulada por uma camada de 2,0 mm exterior a superfície do isolador. Na Figura 11, a geometria do isolador 2 pode ser observada; em azul, destaca-se a distância de escoamento do isolador.

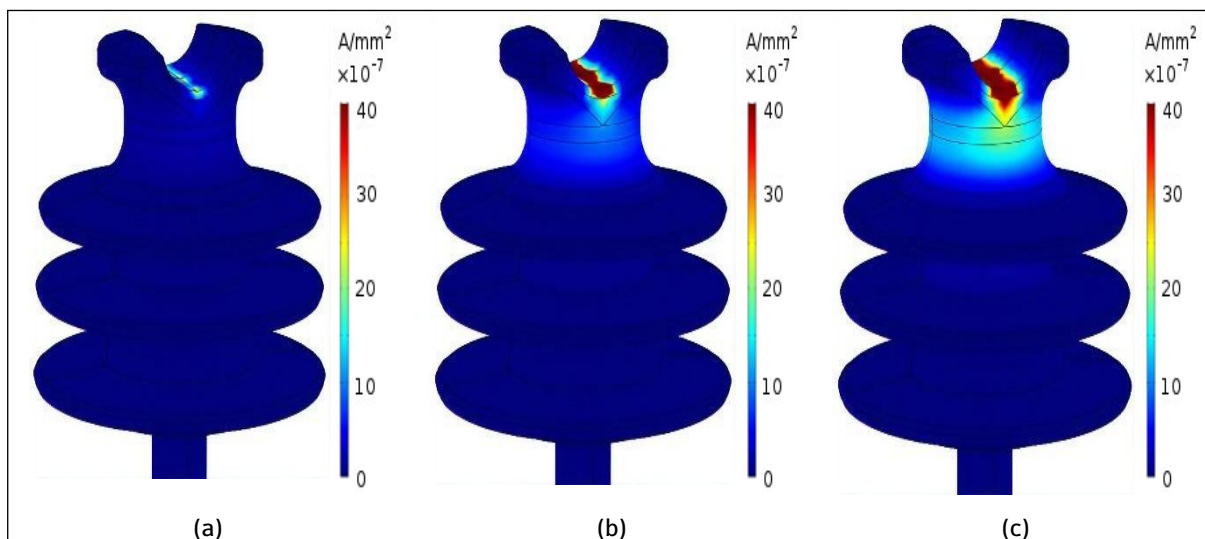
Após a inserção dos materiais e das condições de contorno, a discretização do isolador foi realizada e, em seguida, as análises das variáveis de interesse. A discretização do isolador 2 pode ser observada na Figura 12.

Figura 9 – Campo elétrico no isolador 1 para três níveis de poluição: (a) leve, (b) intermediária e (c) elevada



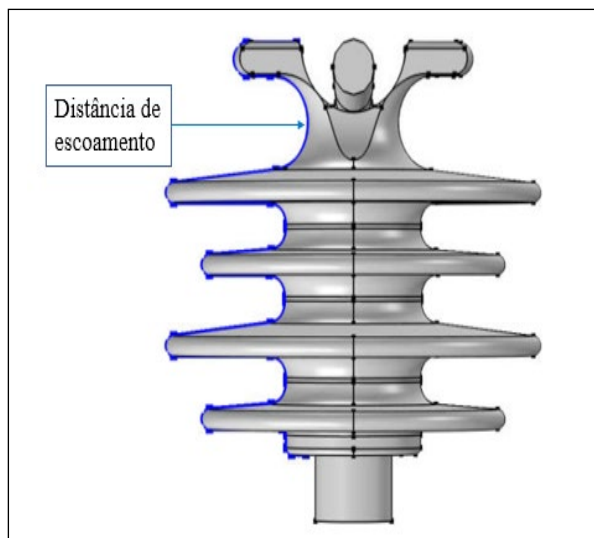
Fonte: Elaboração própria

Figura 10 – Densidade de corrente no isolador 1 com poluição: (a) leve, (b) intermediária e (c) elevada



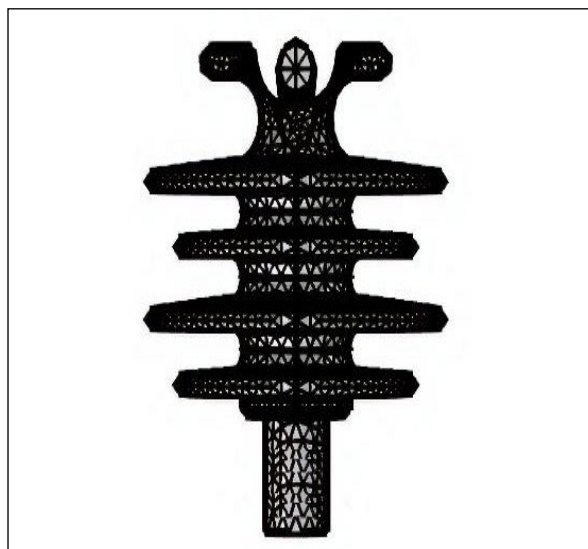
Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – Geometria em 3D modelada no AutoCAD® do isolador 2



Fonte: Elaboração própria

Figura 12 – Discretização da geometria do isolador 2

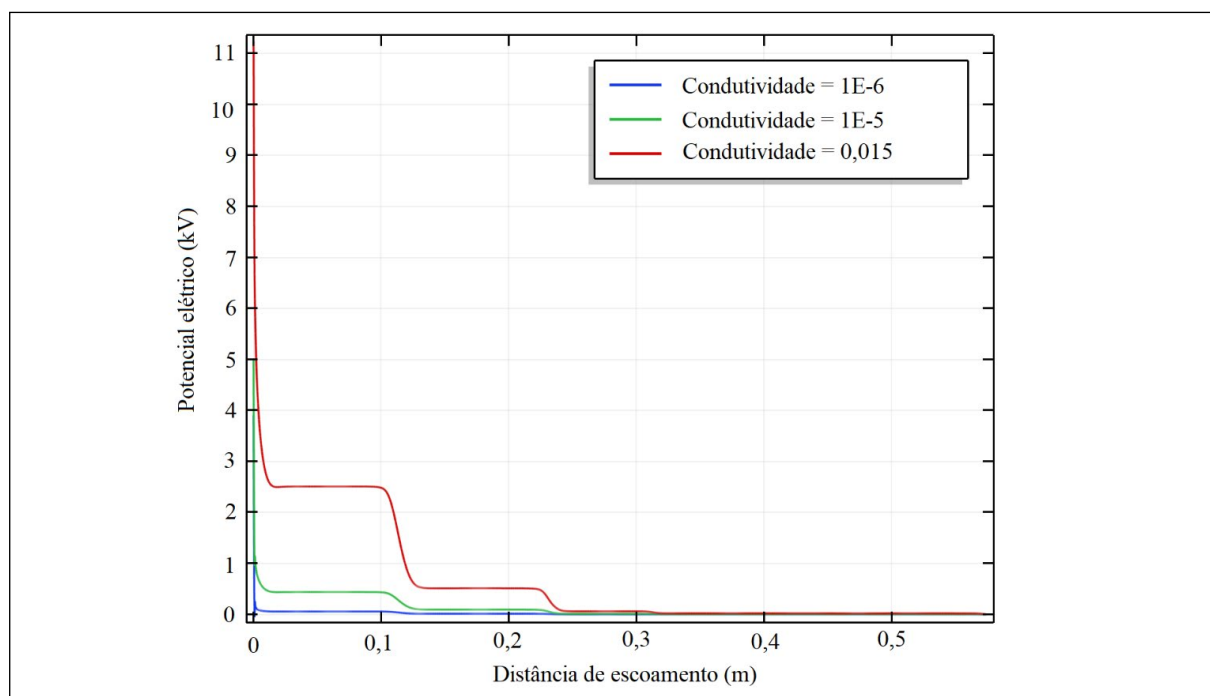


Fonte: Elaboração própria

Conforme apresentado na seção 3, aplica-se 15 kV no terminal fase. A distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento do isolador 2 para os três níveis de poluição propostos é ilustrada na Figura 13. A poluição leve corresponde à condutividade

apresentada em azul, a poluição média corresponde à condutividade apresentada em verde e a poluição elevada corresponde à condutividade apresentada em vermelho.

Figura 13 – Potencial elétrico ao longo da distância de escoamento para três níveis poluição: (a) leve, (b) intermediária e (c) elevada



Fonte: Elaboração própria

Por meio da análise do gráfico da Figura 13, verifica-se que, quanto maior o nível de poluição, maiores serão os valores do potencial elétrico ao longo do isolador. Esse comportamento é observado porque, conforme a poluição aumenta, a condutividade na superfície do isolador será maior.

A variação da distribuição de campo elétrico no isolador 2 pode ser visualizada na Figura 14.

Com o aumento no nível de poluição, pode-se constatar que o campo elétrico se torna mais intenso ao longo do isolador. Além da distribuição de potencial e campo elétrico, foi simulado, ainda, o comportamento da densidade de corrente na superfície do isolador 2, conforme ilustrado na Figura 15.

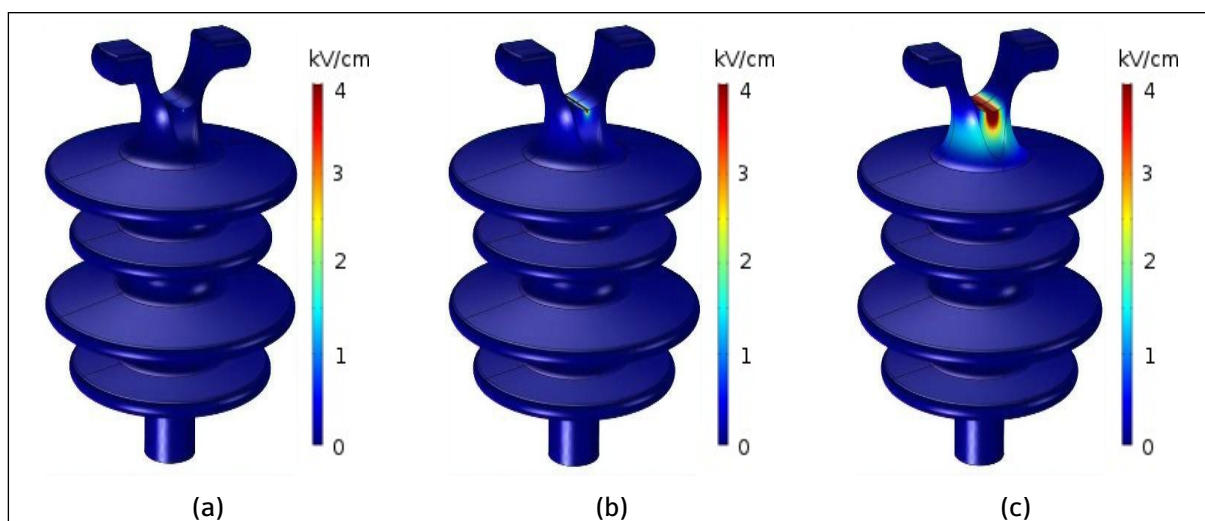
Constata-se que a densidade de corrente se comporta de maneira semelhante ao potencial e

campo elétrico, no sentido de aumentar o número de regiões em que é mais intensa.

5 Conclusão/Considerações

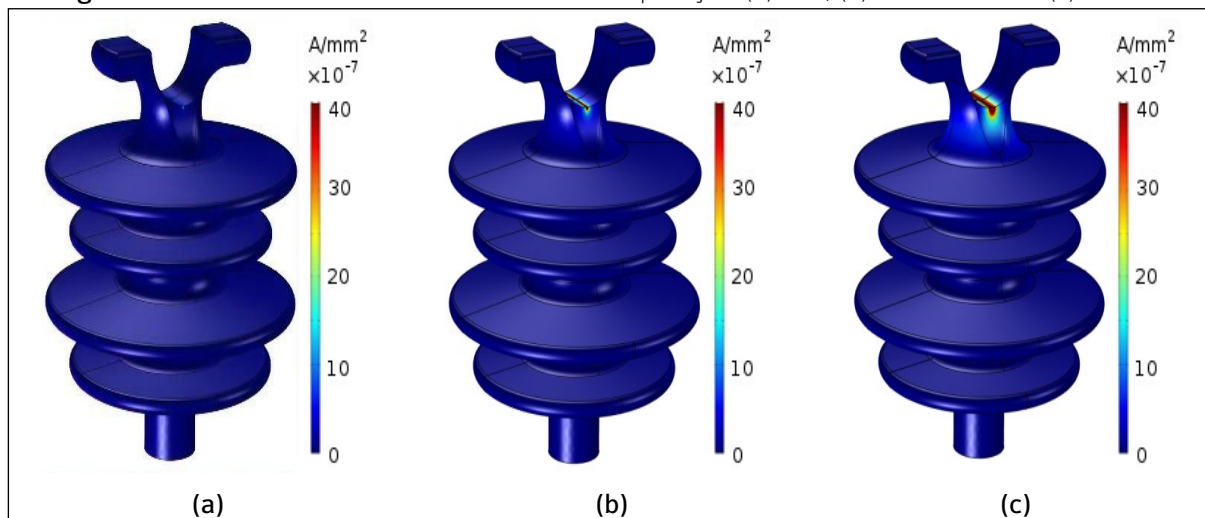
Neste artigo, o campo elétrico, o potencial elétrico e a densidade de corrente foram avaliados e, conseqüentemente, a eficiência do isolador com diferentes níveis de poluição. As simulações foram realizadas com o *software* COMSOL *Multiphysics*, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos, com a modelagem 3D das duas topologias realizada por meio do *software* AutoCAD. A incidência da poluição foi modelada por meio da inserção de uma camada condutiva sobre a superfície dos isoladores, variando parâmetros de condutividade e permissividade, que emulam três níveis de poluição.

Figura 14 – Distribuição do campo elétrico no isolador 2 com poluição: (a) leve, (b) intermediária e (c) elevada



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Densidade de corrente no isolador com poluição: (a) leve, (b) intermediária e (c) elevada



Fonte: Elaboração própria

Os resultados da modelagem dos isoladores provaram ser semelhantes aos dos isoladores reais, uma vez que os valores de distribuição de potencial, campo elétrico e densidade de corrente obtidos são condizentes com a teoria e com pesquisas realizadas por outros autores. Constatou-se, então, que a poluição altera o comportamento elétrico de isoladores em operação.

Comparando os resultados dos isoladores em diferentes condições de poluição, verificou-se que o comportamento da distribuição de potencial, outrora isolante, passou a se mostrar resistivo, comprometendo a capacidade de isolação do isolador. Esse comportamento é obtido porque a condutividade na superfície do isolador será maior à medida que o nível de poluição aumenta. Na análise do campo elétrico, também se constatou que este aumenta com o crescimento da poluição, o que pode acarretar o desgaste precoce do isolador. Em termos de densidade de corrente, percebeu-se também sua elevação com o aumento da poluição, o que implica no crescimento da corrente de fuga e consequente aumento de perdas.

Comparando o desempenho entre os dois tipos de isoladores, constatou-se que o isolador 2 consiste na melhor opção, pois apresenta valores menores de distribuição de potencial, campo elétrico e densidade de corrente. Portanto, é possível atribuir a vantagem do isolador 2 à sua maior distância de escoamento, que é de 58 cm, 38% maior do que a distância de escoamento do isolador 1, que é de 42 cm.

Com o objetivo de tornar a análise realizada neste artigo mais próxima da realidade, pretende-se, nas próximas pesquisas, investigar, além da influência da poluição e do formato do isolador, o impacto dos defeitos internos e externos nos isoladores de pino, que podem ocorrer tanto devido a falhas no processo de fabricação quanto devido à sua degradação durante a operação dos isoladores.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Copele) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) que viabilizaram o aporte dos recursos necessários à pesquisa, cujos resultados obtidos estão registrados neste artigo técnico.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, M.; WATERS, R. T.; HADDAD, A. Visual and infrared techniques for the assessment of partial arcs on conventional and textured insulator surfaces. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 20., 2017, Buenos Aires. Proceedings [...]. Buenos Aires: ISH Collection, 2017. Disponível em: https://e-cigre.org/publication/ISH2017_531-visual-and-infrared-techniques-for-the-assessment-of-partial-arcs-on-conventional-and-textured-insulator-surfaces. Acesso em: 15 nov. 2019.
- AMIN, M; SALMAN, M. Aging of polymeric insulators (an overview). *Reviews on Advanced Materials Science*, v. 13, n. 2, p. 93-116, 2006. Disponível em: http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_21306/amin.pdf. Acesso em: 15 nov. 2019.
- BARROS, R. M. R.; FERREIRA, T. V.; COSTA, E. G. Determinação do posicionamento ótimo de anel equalizador em isoladores poliméricos. *Ingeniería Energética*, v. 34, n. 2, p. 89-97, 2013. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4334869>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- BEZERRA, J. M. B. et al. Evaluating failures of polymer insulators in Brazilian distribution networks. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 35, n. 1, p. 38- 44, 2018. DOI : 10.1109/MEI.2019.8575685. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8575685>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- DIAS, B. A. et al. Simulação computacional dos efeitos do limo sobre isoladores de vidro. In: ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ (ERAC), 17., 2017, Ciudad del Leste. Anais [...]. Ciudad del Leste: [s. n.], 2017.
- DIAS, B. A. et al. Análise do efeito da poluição em isoladores poliméricos do tipo pino. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED DIELECTRICS AND APPLICATIONS (IWADA), 3., 2019, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: [s. n.], 2019.
- DINIZ, L. Aprimoramento da inspeção de isoladores poliméricos por termografia e campo elétrico. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <https://sites.google.com/a/dee.ufcg.edu.br/pos-graduacao/banco-de-dissertacoes>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- EPRI. Field guide: visual inspection of polymer insulators. [S. l.]: Electric Power Research Institute, 2006.
- FERREIRA, T. V. Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos. 2007. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Disponível em: <https://sites.google.com/a/dee.ufcg.edu.br/pos-graduacao/banco-de-dissertacoes>. Acesso em: 15 nov. 2019.

FERREIRA, T. V. Estimativa inteligente da poluição de isolamentos elétricos baseada nos VECSE do ruído ultrassônico. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <https://sites.google.com/a/dee.ufcg.edu.br/pos-graduacao/banco-de-teses>. Acesso em: 15 nov. 2019.

FLORENTINO, M. T. B. Análise de sensibilidade do método dos vetores de energia dos centroides das sub-bandas espectrais aplicado ao monitoramento de isoladores poliméricos. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015. Disponível em: <https://sites.google.com/a/dee.ufcg.edu.br/pos-graduacao/banco-de-dissertacoes>. Acesso em: 15 nov. 2019.

HAMDAM, R. B. Electric field study of silicon rubber insulator using finite element method (SLIM). 2006. Master Thesis (Master of Engineering) – Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur, 2006. Disponível em: <http://eprints.utm.my/id/eprint/2141/1/RohaizaHamdanMFKE2006.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LAN, L. et al. The influence of natural contamination on pollution flashover voltage waveform of porcelain insulators in heavily polluted area. *IEEE Access*, v. 7, p. 121395-121406, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936868. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8809770>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LOPES, D. S. Modelo de elementos finitos aplicado na avaliação de desempenho de isolantes em ambientes contaminados. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/19497>. Acesso em: 15 nov. 2019.

MELLO, D. R. et al. Avaliação de equipamentos de subestações e linhas de transmissão contaminados com limo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SENDI), 18., 2008, Olinda. Anais [...]. Olinda: [s. n.], 2008. p. 1-10. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/AVALIAC%CC%A7A%CC%83O-DE-EQUIPAMENTOS-DE-SUBESTAC%CC%A7O%CC%83ES-E-LINHAS-DE-TRANSMISSA%CC%83O-CONTAMINADOS-COM-LIMO.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

NIGRI, A. I. Desempenho de linhas de transmissão. ponto de vista da manutenção. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 15., 1999, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: [s. n.], 1999. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2015/12/DESEMPENHO-DE-ISOLADORES-DE-LINHAS-DE-TRANSMISS%CC%83O-PONTO-DE-VISTA-DA-MANUTEN%CC%87%CC%83O.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.

OLIVEIRA, S. M.; TOURREIL, C. H. Aging of distribution composite insulators under environmental and electrical stresses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 1074-1077, 1990. DOI: 10.1109/61.53124. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/53124>. Acesso em: 15 nov. 2019.

PINHEIRO, W. A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de média tensão, instalados em ambientes agressivos. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-15082008-174328/pt-br.php>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SADIKU, M. N. O. Elementos de eletromagnetismo, 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SUNDARAM, S. S. et al. Insulator pollution mapping of the northern region of the Indian power system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 20., 2017, Buenos Aires, Proceedings [...]. Buenos Aires: [s. n.], 2017. Disponível em: https://e-cigre.org/publication/ISH2017_594-insulator-pollution-mapping-of-the-northern-region-of-the-indian-power-system. Acesso em: 15 nov. 2019.

VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin layer. In: 2013 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, 2013, Ottawa. Proceedings [...]. Ottawa: [s. n.], 2013. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554278. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6554278>. Acesso em: 15 nov. 2019.

ZHANG, Z et al. AC flashover performance of different shed configurations of composite insulators under fan-shaped non-uniform pollution. *High Voltage*, v. 3, n. 3, p. 199-206, 2018. DOI: 10.1049/hve.2018.0002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8479400>. Acesso em: 15 nov. 2019.